

水素-酸素予混合気体への衝撃波入射により 誘起される燃焼波の挙動*

小原 哲郎^{*1}, 楠原 由樹子^{*2}
栗原 慶博^{*3}, 大八木 重治^{*1}

Behavior of Combustion Wave Induced by Propagation of Shock Wave into Premixed Gas of Hydrogen and Oxygen

Tetsuro OBARA^{*4}, Yukiko NARAHARA,
Norihiko KURIHARA and Shigeharu OHYAGI

^{*4} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Ohkubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Experiments were conducted in order to investigate a behavior of combustion wave when a shock wave was propagated into a combustible premixed gas of hydrogen and oxygen. A phenomenon occurring in the premixed gas can be classified into four types, i.e. (a) the shock wave just transmitted into the gas without causing ignition for the shock wave of low-Mach number, (b) the gas was ignited behind the shock wave and a deflagration wave was propagated following the shock wave, (c) the deflagration wave transited to a detonation wave behind the shock wave, (d) a detonation wave was directly initiated just behind incident shock wave of high-Mach number. In this study, a shock wave produced by a detonation-driven shock tube was transmitted into a hydrogen-oxygen premixed gas varied with an equivalence ratio ϕ , initial pressure p_1 and Mach number of the shock wave M_{st} . As a result, the phenomena observed in the gas was classified using a cell-size λ for steady detonation wave, since the cell-size was inversely proportional to a chemical reaction rate of the gas. For the case of sensitive gases having small cell-size, the detonation wave was directly initiated behind the shock wave even though the Mach number of the shock wave was relatively low. An empirical equation to evaluate a pressure was obtained, which is a threshold pressure to ignite the gas behind incident shock wave.

Key Words: Detonation, Shock Wave, Ignition, Combustion

1. はじめに

可燃性の予混合気体中に衝撃波が入射した場合、衝撃波の伝ばマッハ数が高く衝撃波背後の温度が予混合気の自己着火温度以上であれば、予混合気は着火し燃焼波が生じることになる。予混合気中を伝ばする燃焼波は伝ば速度の低いデフラグレーション波と伝ば速度の高いデトネーション波に大別される⁽¹⁾。さらにデトネーション波が生成される過程には、デフラグレーション波がデトネーション波に遷移する場合と、デトネーション波が直接開始される二種類に分類できる。したがって、可燃性予混合気中に衝撃波が入射した際に生じる現象は、入射衝撃波マッハ数が高くなるにし

たがって以下の(a)から(d)へ変化することになる。

- (a) 入射する衝撃波の伝ばマッハ数が低く衝撃波背後の温度が自己着火温度以下である場合には、予混合気は着火せず、衝撃波のみが予混合気中を伝ばする(Non Ignition)。
- (b) 衝撃波背後の予混合気が着火し、伝ば速度の遅いデフラグレーション波が衝撃波に追従して伝ばする(Deflagration Propagation)。
- (c) 予混合気が着火することにより生じたデフラグレーション波がデトネーション波へ遷移するDDT現象(Deflagration to Detonation Transition)が生じ、デトネーション波が予混合気中を伝ばする(DDT)。
- (d) 衝撃波の伝ばマッハ数が十分高い場合には、衝撃波が予混合気に入射した直後にデトネーション波が直接開始される(Direct Initiation)。

* 原稿受付 2006年4月26日。

*1 正員、埼玉大学大学院理工学研究科(338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。

*2 准員、(株)東芝横浜事業所(235-8522 横浜市磯子区新杉田町8) [元: 埼玉大学大学院理工学研究科]。

*3 学生員、埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: tobara@mech.saitama-u.ac.jp

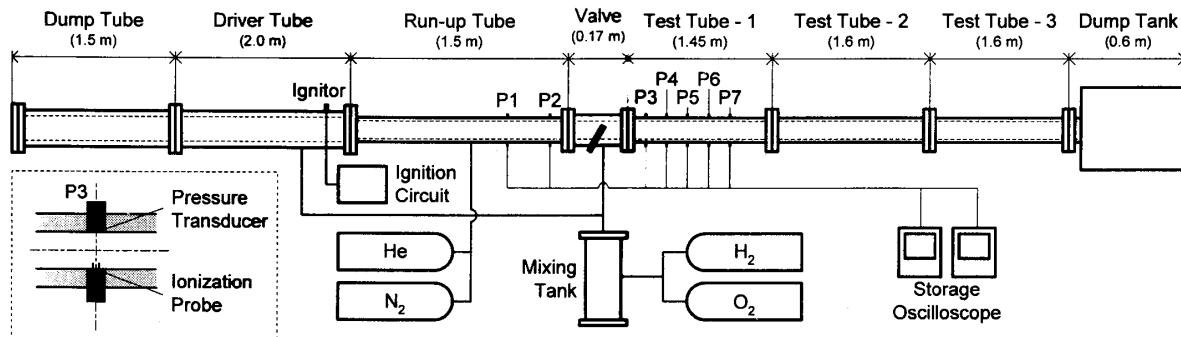


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up using detonation-driven shock tube.

予混合気中に衝撃波が入射した際、これら(a)～(d)の現象のうちいずれが生じるかは、予混合気を構成する燃料や酸化剤の種類、初期圧力、初期温度、入射衝撃波マッハ数などの初期条件および予混合気が充填されている管の内径や長さなどの物理的条件によって支配され複雑である。例えば予混合気が量論混合比の水素-空気であり標準状態であれば、その自己着火温度は560～600 Kの範囲である⁽³⁾。衝撃波背後の温度が600 Kとなる入射衝撃波マッハ数をRankine-Hugoniotの関係式⁽⁴⁾⁽⁵⁾より求めると2.36となる。したがって、伝ばマッハ数が2.36以上の衝撃波であれば、予混合気は衝撃波背後で着火すると考えられ、(a)と(b)の現象を区別する目安の衝撃波マッハ数を与える。しかしながら、予混合気が着火した場合に(b)～(d)の現象のいずれが生じるかを分類し予測することは容易ではなく、燃焼学的な興味がある。また、衝撃波が可燃性予混合気中に入射する問題は、安全工学上の見地からだけではなく⁽²⁾、パルスデトネーションエンジンの研究や⁽⁶⁾⁽⁷⁾、スクラムジェット燃焼器内における着火現象とも関連し重要である^{(8)～(11)}。

可燃性予混合気の着火限界や着火遅れ時間を調べる実験の多くには反射衝撃波背後の状態量が用いられている^{(12)～(14)}。具体的には衝撃波管端における反射衝撃波背後を利用して着火過程の可視化観察が行われており、着火には強い着火と弱い着火があることが明らかにされている⁽¹²⁾。また、衝撃波が回折、反射することによるDDT過程や⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、衝撃波の収束⁽¹⁷⁾および衝撃波どうしの干渉によるDDT過程について調べられている⁽¹⁸⁾。しかしながら、入射衝撃波背後において可燃性予混合気の着火過程について調べた研究は少なく⁽¹⁹⁾、十分明らかにされていない。

本論では、デトネーション波によって駆動される衝撃波管を用いて生成させた衝撃波を水素-酸素予混合気(以下、酸水素混合気と略す)が充填してある管内に入射し、その際生じる現象について明らかにすること

を目的とする。具体的には、酸水素混合気の当量比 ϕ 、初期圧 p_1 および入射衝撃波マッハ数 M_{si} を変化させて実験を行った。実験で得られた圧力波形を解析することにより、燃焼波の伝ば現象の分類を行い、実験条件との相関について調べたので報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 図1に実験に用いたデトネーション駆動型衝撃波管の概略を示す。デトネーション駆動型衝撃波管は、図の左から順にダンプチューブ、デトネーション駆動管、助走管、ボールバルブ、計測管1～3およびダンプタンクで構成され、装置全体の長さは約10.5 mである。計測管1～3には酸水素混合気を充填し衝撃波を左方向から入射させる実験を行った。伝ばマッハ数の比較的高い衝撃波を計測管内に入射させるため、駆動管においてデトネーション波を発生させる方式を用いた⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。すなわち、デトネーション駆動管内に酸水素混合気を充填し、駆動管右端において点火することで駆動管内を左方向へ伝ばするデトネーション波が生成される。デトネーション波背後の気体は高温・高圧状態となるので、これを貯氣槽として伝ばマッハ数の高い衝撃波を右方向へと駆動するUpstream Modeを用いた⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。デトネーション反応を利用することにより、駆動管内の初期圧が低い条件でも比較的伝ばマッハ数の高い衝撃波を生成できる利点がある。なお、駆動管内には点火端からデトネーション波が生成されるまでの距離を短くすることを目的にスパイラル状のコイルを挿入した。また、ダンプチューブは内部を真空状態としデトネーション波を減衰させるために用いた。

被駆動管は、不燃性気体を充填する長さ1.5 mの助走管、ボールバルブおよび酸水素混合気を充填する全長4.65 mの計測管1～3で構成され、内径 d は20 mmで一定である。助走管と計測管の間には、内径20 mmのボールバルブを挿入し両気体を分離した。実験を

Table 1 Experimental conditions.

Section	Parameter	Condition
Driver	Gas	$H_2 + O_2 / (2\phi)$
Tube	Equivalence Ratio, ϕ	1.0
	Initial Pressure, p_{4i}	50 ~ 300 kPa
Run-up	Gas	$He + xN_2$
Tube	Molar Ratio of Nitrogen to Helium, x	0.21, 0.39, 0.98
	Initial Pressure, p_1	25, 50, 75, 100 kPa
	Mach Number of Incident Shock Wave, M_{si}	1.43 ~ 2.75
Test	Gas	$H_2 + O_2 / (2\phi)$
Tube	Equivalence Ratio, ϕ	0.5, 1.0, 1.5
	Initial Pressure, p_1	25, 50, 75, 100 kPa
	Mach Number of Transmitted Shock Wave, M_{st}	1.45 ~ 2.84
	Initial Temperature, T_1	300 ± 5 K
	Temperature behind Transmitted Shock Wave, T_2	386 ~ 725 K

開始する際、ボールバルブ内の流路部分は真空状態となっており、バルブを解放した直後から両気体が流れ混合が開始する。したがって、ボールバルブを手動にて開放後、両気体の混合を少なくするため解放から1 s以内に駆動気体を点火した。助走管は、酸水素混合気を充填した計測管に対して一定速度で伝ばする衝撃波を入射させる役割を果たし、管内径に対して100倍の長さがある。助走管には測定孔が2箇所に設けてあり、それぞれP1およびP2と呼ぶ。計測管1には、左端からの距離200 mmの位置から200 mmごとに測定孔が計5箇所に設けてあり、それぞれP3~P7と呼ぶ。測定孔P1~P7にはピエゾ式圧力変換器(PCB Piezotronics, 113A24, 立上り時間1 μ s以下)を取り付け、圧力を計測した。なお、計測管1の測定孔には図1の左下に示すように圧力変換器に対向してイオンプローブが取付けてある。イオンプローブは2本の鉄芯間(間隙約0.8 mm)に90 Vの電圧を印加したものであり、燃焼波背後の導電性を有する既燃気体が鉄芯間を通過することで、鉄芯間が導通状態となる特性を利用して燃焼波の到達を検知する仕組みである。したがって、圧力波形とイオンプローブからの出力時刻が一致していれば、衝撃波と燃焼波が一体化して伝ばしていることになり、伝ばする波をデトネーション波と判別できる。圧力変換器およびイオンプローブからの信号はストレージオシロスコープ(横河電機, DL-1540, サンプリング200 MS s^{-1})2台を用いて記録した。

2.2 実験方法

表1に実験条件を示す。実験開始時には、ダンプチューブと駆動管の間、駆動管と助

走管の間、および計測管3とダンプタンクの間に厚さ50 μ mのマイラー膜を挿入した。駆動管には量論の酸水素混合気を充填し、初期圧 p_{4i} を50 ~ 300 kPaの範囲で変化させることにより入射衝撃波マッハ数を変化させた。助走管にはヘリウムと窒素の混合気($He + xN_2$)を充填し、初期圧は計測管の初期圧と等しく設定した。計測管1~3には酸水素混合気を充填し、当量比 ϕ を0.5, 1.0, 1.5の3通り、初期圧 p_1 を25, 50, 75, 100 kPaの4通り、計12通りの組合せで実験を行った。

衝撃波が助走管から計測管1へと入射する際、助走管内部に充填した気体1と計測管1に充填した気体2の音響インピーダンスが一致していない場合には、その接触面において反射衝撃波や膨張波が発生するため、計測管内に入射した衝撃波背後の状態量は一定とならない。したがって、気体1と気体2の音響インピーダンスを一致させて実験を行う必要がある。音響インピーダンスは、気体の密度を ρ 、音速を c とすれば、 ρc で表されるため、気体1および2の初期温度および初期圧が等しい条件に対して、音響インピーダンスを等しくするには次式が成立すればよいことになる。

$$\gamma_1 w_1 = \gamma_2 w_2 \quad (1)$$

ここで、 γ_1 および γ_2 はそれぞれ気体1および気体2の平均比熱比、 w_1 および w_2 はそれぞれ平均モル質量である。これより、酸水素混合気の当量比 ϕ に応じて助走管に充填する窒素のヘリウムに対するモル比 x を求め、音響インピーダンスを一致させてある。酸水素混合気の当量比を0.5, 1.0, 1.5と変化させた場合、モル比 x はそれぞれ0.98, 0.39, 0.21になる。

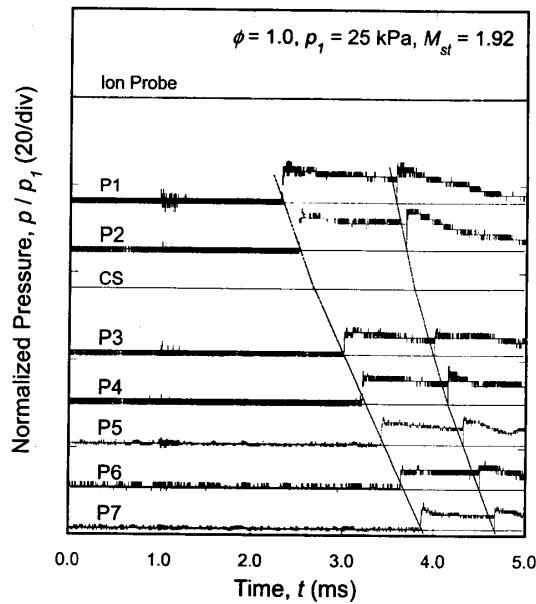


Fig. 2 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower) ($\phi = 1.0, p_1 = 25 \text{ kPa}, M_{si} = 1.87, M_{st} = 1.92$).

助走管内を伝播する入射衝撃波マッハ数 M_{si} は測定孔 P1 と P2 の圧力波形の立上がり時間差から求められる。助走管と計測管に充填した気体の初期温度は等しいので、計測管内に入射した伝達衝撃波マッハ数 M_{st} は衝撃波関係式を用いれば次式のように導出される。

$$M_{st} = \frac{1}{2} \left(\beta + \sqrt{\beta^2 + 4} \right) \quad (2)$$

ここで、 β は入射衝撃波マッハ数 M_{si} の関数であり次式で与えられる。

$$\beta = \frac{\gamma_2 + 1}{\gamma_1 + 1} \sqrt{\frac{\gamma_1 w_2}{\gamma_2 w_1}} \left(M_{si} - \frac{1}{M_{si}} \right) \quad (3)$$

本実験では、入射衝撃波マッハ数を $M_{si} = 1.43 \sim 2.75$ の範囲、伝達衝撃波マッハ数を $M_{st} = 1.45 \sim 2.84$ の範囲で変化させて実験を行った。なお、実験は各気体を充填してから 15 min 放置してから行っているので、充填した気体の温度は室温 ($T_1 = 300 \pm 5 \text{ K}$) に等しいと考えられる。

3. 実験結果

計測管に充填する気体を量論の酸水素混合気、初期圧 p_1 を 25 kPa で一定とし、入射させる衝撃波マッハ数 M_{si} を 1.87, 2.52 および 2.75 と変化させた場合の圧力波形を比較する。次に、初期圧を変化させた場合に計測管内で生成される燃焼波を分類する。

3.1 入射衝撃波マッハ数 $M_{si} = 1.87$ の場合 図 2 は、実験で得られたイオン電流波形(上部)、および

圧力波形(下部 P1~P7)の一例である。縦軸は圧力を初期圧で除した無次元圧力、横軸は時間である。測定孔 P1~P7 に圧力変換器を取付けてあり、測定孔間の距離に比例して圧力波形の原点を移動してある。計測管に充填した酸水素混合気の当量比は $\phi = 1.0$ 、初期圧 $p_1 = 25 \text{ kPa}$ の条件である。助走管内を伝播する衝撃波マッハ数は $M_{si} = 1.87$ 、酸水素混合気に入射した伝達衝撃波マッハ数は式(2)および式(3)を用いれば $M_{st} = 1.92$ 、伝達衝撃波背後における気体の温度は $T_2 \simeq 480 \text{ K}$ と見積もられる。衝撃波が伝播することにより測定孔 P1 および P2 の圧力波形は急峻に立上がり、衝撃波はヘリウム窒素混合気から酸水素混合気の接触面(Contact Surface, CS で示す)に入射する。この際、測定孔 P1 および P2 の圧力波形には反射波の影響が検出されていない。したがって、両気体の音響インピーダンスは一致しており衝撃波や膨張波が接触面で生じていないことが確認できる。なお、測定孔 P1 および P2 の位置では入射衝撃波から約 1.2 ms 遅れて第 2 の衝撃波が伝播する。これは、デトネーション波が駆動管内を伝播した後、駆動管とダンプチューブを仕切る隔膜で反射することによる反射衝撃波が助走管内を伝播するためである。したがって、可燃性予混合気中において生じた燃焼波を分類するには、試験時間を約 1.2 ms に限定しデータを整理する必要がある。伝達衝撃波が計測管内を伝播することにより、測定孔 P3 ~P7 の位置では圧力が順に立上がる。しかし、イオンプローブからの出力は検出されていないことから、この実験条件では衝撃波のみが酸水素混合気中を伝播しており、衝撃波背後で燃焼波が生じていない。したがって、この実験条件における結果は前述した現象のうち(a) Non Ignition に分類される。伝達衝撃波と第 2 の反射衝撃波との到達時間差は、計測管を伝播するにしたがって短くなる。これは、伝達衝撃波によって酸水素混合気の温度が上昇し音速が上昇するためである。なお、第 2 の反射衝撃波背後でもイオンプローブからの出力は検出されておらず、酸水素混合気は着火していない。

3.2 入射衝撃波マッハ数 $M_{si} = 2.52$ の場合 図

3 は、酸水素混合気の当量比および初期圧は図 2 と同様とし、入射衝撃波マッハ数を $M_{si} = 2.52$ 、伝達衝撃波マッハ数を $M_{st} = 2.60$ ($T_2 \simeq 660 \text{ K}$) に上昇された場合の同様の波形である。入射衝撃波マッハ数が図 2 に比較し高いため、衝撃波背後の圧力も高くなる。測定孔 P1 および P2 の圧力波形については図 2 と同様であるが、測定孔 P3 の位置では圧力の立上がりに同期してイオンプローブの出力が確認できる。また、測定

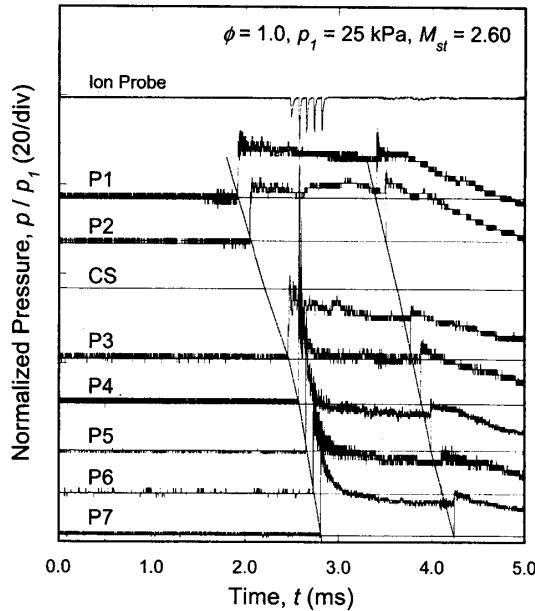


Fig. 3 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower) ($\phi = 1.0, p_1 = 25 \text{ kPa}, M_{si} = 2.52, M_{st} = 2.60$).

孔 P4 の位置における圧力波形は伝達衝撃波背後で急峻に立上がる。また、イオンプローブの出力時刻も測定孔 P4 における圧力上昇と同期している。したがって、この条件では酸水素混合気が衝撃波背後で着火したと考えられる。また、P4 における圧力上昇値は初期圧の約 50 倍に達することから、この条件ではデフラグレーション波がデトネーション波に遷移する DDT 現象が P3 と P4 の測定孔の間で生じ Overdriven (過駆動) 状態のデトネーション波が P4 の測定孔付近を伝播したと考えられる。したがって、この実験条件は前述した現象の (c) DDT に分類される。Overdriven デトネーション波は P5 以降の位置において直ちに減衰する。さらに P5~P7 の位置における圧力波形では、圧力が立上った後、時間の経過とともにデトネーション波に追随する Taylor 膨張波により圧力は減衰し、立上がりから約 0.5 ms 以降ではほぼ一定の圧力に保たれる様子が解る。

3.3 入射衝撃波マッハ数 $M_{si} = 2.75$ の場合 図 4 に入射衝撃波マッハ数を $M_{si} = 2.75$ 、伝達衝撃波マッハ数を $M_{st} = 2.84$ ($T_2 \approx 730 \text{ K}$) に上昇させた場合の同様の波形を示す。この条件では、衝撃波が計測管に入射した直後である測定孔 P3 の位置において圧力は急峻に立上がる。また、P3 の位置における圧力の立上りとイオンプローブの出力波形は同期していることから、酸水素混合気が伝達衝撃波が入射した直後に着火し、デトネーション波が直接開始したと考えられる。測定孔

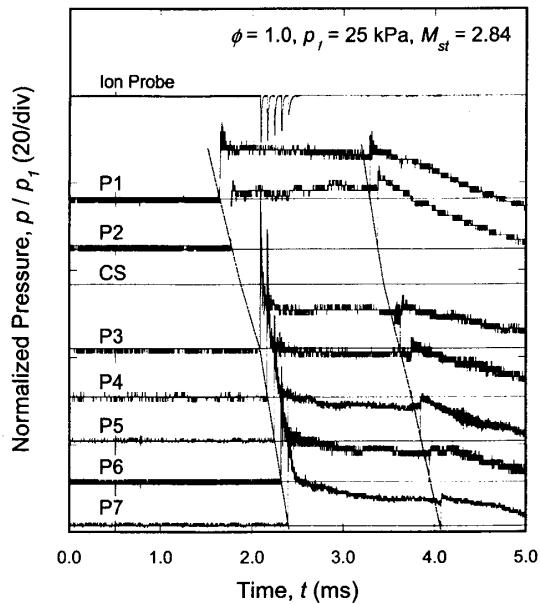


Fig. 4 Profile of ionization current (upper) and pressure (lower) ($\phi = 1.0, p_1 = 25 \text{ kPa}, M_{si} = 2.75, M_{st} = 2.84$).

P3 は計測管の管端から 200 mm の位置に取付けられており、この位置でデトネーション波の伝ばが確認できた場合、本研究ではデトネーション波が直接開始したと分類した。したがって、この実験条件は前述した現象の (d) Direct Initiation に分類される。また、デトネーション波は計測管内をほぼ一定の速度 $D \approx 2.67 \text{ km s}^{-1}$ で伝ばしており、この速度は Chapman-Jouguet のデトネーション速度⁽²²⁾ ($D_{CJ} = 2.77 \text{ km s}^{-1}$) にほぼ等しい。

3.4 初期圧の違いによる燃焼波の分類 図 5 は、酸水素混合気の当量比を $\phi = 1.0$ で一定とし、初期圧 p_1 を 25, 50, 75, 100 kPa と変化させ、入射衝撃波マッハ数の違いによって計測管内で生じる現象を分類した結果である。縦軸は伝達衝撃波マッハ数 M_{st} 、横軸は酸水素混合気の初期圧 p_1 である。図中の × 印は酸水素混合気が着火せず衝撃波のみが伝ばする (a) Non Ignition, △ 印は酸水素混合気が着火し DDT を介してデトネーション波が生成される (c) DDT, ○ 印はデトネーション波が直接開始される (d) Direct Initiation に対応する。また、図には (c) DDT に分類されたデータに対し指指数関数による近似曲線を示す。これより、初期圧が高い場合には入射衝撃波マッハ数が小さい条件に対しても酸水素混合気は着火しデトネーション波が生じるため、 $M_{st} - p_1$ の関係は右下がりの傾向となる。酸水素混合気の初期圧 p_1 が高い場合には、(c) DDT が生じるマッハ数の範囲が狭くなり、(a) Non Ignition が生じるマッハ数と大きな差がなく、(d) Direct Initiation へと移行する

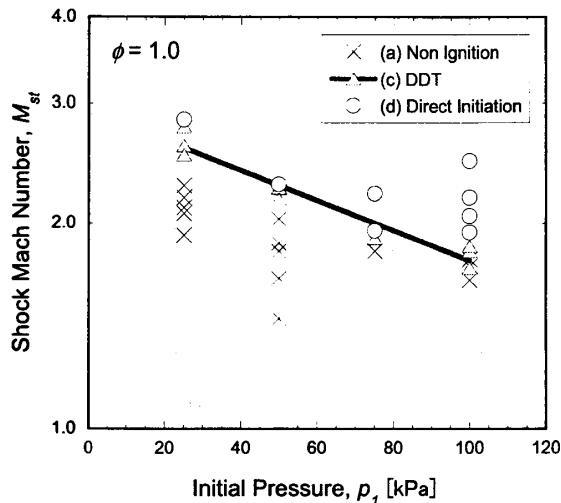


Fig. 5 Classification of combustion wave with a difference of initial pressure p_1 and transmitted shock Mach number M_{st} ($\phi = 1.0$).

ことが解る。これは、酸水素混合気の初期圧が高い場合には反応速度が高くなるためと考えられる。図より、量論の酸水素混合気が着火するしきい値となる伝達衝撃波マッハ数 M_{st} の初期圧 p_1 [kPa] (= 25 ~ 100 kPa)に対する関係は次式で表される。

$$M_{st} \simeq 2.93 \exp(-5.0 \times 10^{-3} p_1) \quad (4)$$

上式で求められるマッハ数以上の衝撃波が初期圧 $p_1 = 25 \sim 100$ kPa の酸水素混合気に入射した場合には、酸水素混合気は着火する。

4. 考察

酸水素混合気中に衝撃波が入射した際、衝撃波背後において生成される燃焼波の挙動について、ある物理量を用いて整理しておくことは安全工学上の観点から重要である。前述したように入射衝撃波背後における燃焼波は本実験条件下においては、(a) Non Ignition, (c) DDT, (d) Direct Initiation の3種類に分類され、(b) Deflagration Propagation は観察されていない。すなわち、酸水素混合気中において燃焼波が生じた場合には、測定孔 P3~P7 の範囲内においてデトネーション波に遷移する結果が得られている。これは、燃料気体として用いた水素の Detonability が高いためである。計測管内を伝ばす波の挙動については、予混合気を構成する燃料・酸化剤の種類、当量比 ϕ 、初期圧 p_1 および入射衝撃波マッハ数 M_{si} が関与すると考えられ複雑であり明らかにされていない。したがって、予混合気の初期条件および入射衝撃波に関する物理量を用いて着火条件を整理することを考える。ここ

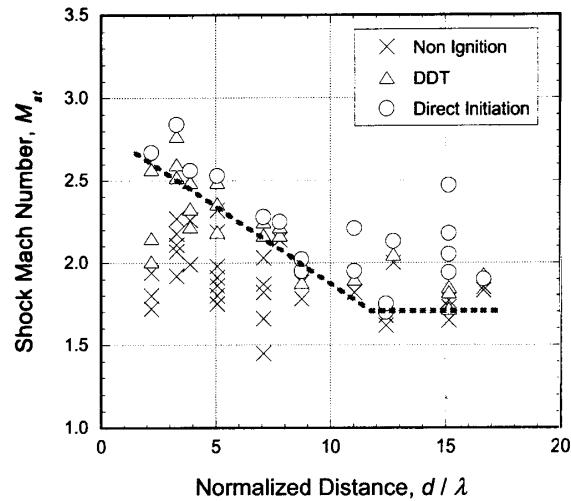


Fig. 6 Classification of combustion wave on transmitted shock Mach number M_{st} vs. non-dimensional distance d/λ ($\phi = 0.5 \sim 1.5$, $p_1 = 25 \sim 100$ kPa).

で、酸水素混合気の初期条件に依存する代表長さとして、著者らによりこれまでに実験的に求められている定常デトネーション波のセルサイズ $\lambda^{(23)}$ を用いてデータを整理する。デトネーション波が伝ばす際には、入射衝撃波、反射衝撃波、マッハ軸衝撃波から構成される三重点を伴いセル構造を呈して伝ばすることが知られている⁽¹⁾。セルサイズ λ は、予混合気の化学反応速度に反比例するパラメータであり⁽¹⁾、予混合気の初期条件に依存する代表寸法と位置づけられる。本研究では計測管の内径 d を 20 mm で一定として実験を行っているが、管内に存在するセルの個数を示す無次元距離 d/λ によって実験データを整理する。さらに、燃焼波の挙動は予混合気に入射した伝達衝撃波マッハ数 M_{st} (衝撃波背後の温度 T_2) にも依存する。

図 6 は、縦軸を伝達衝撃波マッハ数 M_{st} 、横軸を無次元距離 d/λ とし、酸水素混合気の当量比 ϕ を 0.5, 1.0, 1.5、初期圧 p_1 を 25 ~ 100 kPa の範囲で変化させて実験を行うことにより得られた全データをプロットした結果である。本実験では計測管の内径 d は 20 mm で一定としているため、横軸の増加はセルサイズが小さく反応速度が大きい予混合気を意味する。 \times 印は(a) Non Ignition, \triangle 印は(c) DDT, \circ 印は(d) Direct Initiation に相当する。また、図にはデトネーション波が DDT 現象を介して間接開始する(c)と直接開始する(d)の境界を点線で示す。図 6 より、 d/λ の増加に伴い酸水素混合気が着火する伝達衝撃波マッハ数 M_{st} は減少する。無次元距離 d/λ が小さく反応性の低い酸水素混合気が着火するには、DDT 過程を介してデトネーショ

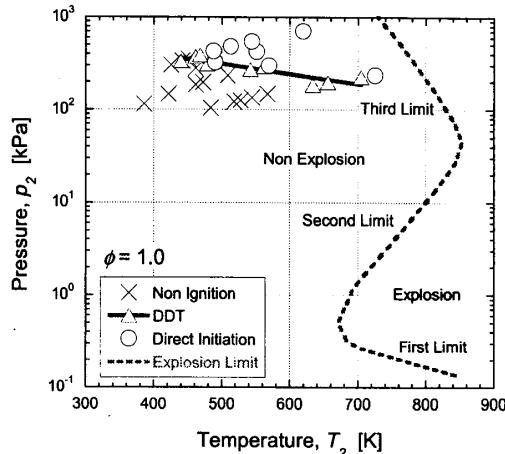


Fig. 7 Classification of combustion wave on pressure behind transmitted shock wave p_2 vs. temperature T_2 , dotted line: explosion limit by Semenov⁽²⁾ ($\phi = 1.0$, $p_1 = 25 \sim 100$ kPa).

ン波が間接開始する伝達衝撃波マッハ数の範囲は大きい。さらに、無次元距離がほぼ $d/\lambda > 12$ の条件に対し、酸水素混合気が着火する伝達衝撃波マッハ数は一定の値 $M_{st} \approx 1.8$ ($T_2 \approx 460$ K) をとる。これは、無次元距離 d/λ の増加に伴い酸水素混合気の反応性が高くなってしまって伝達衝撃波背後の温度が酸水素の開始反応を生じる温度に達しなければ酸水素混合気は着火しないことに相当する。

図 7 は、伝達衝撃波背後の圧力 p_2 および温度 T_2 を用いて燃焼波を分類した結果である。図中の記号は図 6 と同じである。また、同図には Semenov による爆発限界⁽²⁾が点線で示してある。伝達衝撃波背後の温度および圧力は、入射衝撃波マッハ数 M_{si} から式(2)を用いて伝達衝撃波マッハ数 M_{st} を求め、さらに Hugoniot の式を満足するように温度および圧力を求めた結果である。Semenov の結果は、静止した酸水素混合気に対して爆発限界を調べたものであり、爆発曲線の右側が爆発する圧力・温度条件、左側が爆発しない条件を示す。本実験では、酸水素混合気中に衝撃波を入射させ衝撃波背後における燃焼波の挙動について示したものであり、Semenov による実験条件とは本質的に異なるが、酸水素混合気の温度が上昇すれば着火する圧力が低下することに関しては、Semenov の爆発曲線のうち第 3 限界と定性的に一致する。しかしながら、Semenov の爆発曲線では爆発しない圧力・温度条件においても伝達衝撃波背後で燃焼が生じることが明らかである。これは、前述したように本実験では Semenov の実験とは異なり伝達衝撃波背後の状態量を利用しておらず、酸水素混合気に流れが誘起されることが差異を生じた一

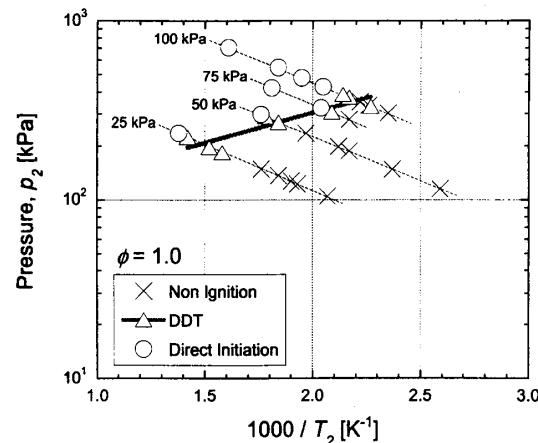


Fig. 8 Classification of combustion wave on pressure behind transmitted shock wave p_2 vs. inverse of temperature, $1/T_2$ ($\phi = 1.0$, $p_1 = 25 \sim 100$ kPa).

因と考えられるが、今後の検討課題である。

図 8 は、量論の酸水素に対し縦軸に伝達衝撃波背後圧 p_2 の対数、横軸に伝達衝撃波背後温度 T_2 の逆数として実験データをプロットした結果である。図には酸水素混合気の初期圧 p_1 が 25 ~ 100 kPa まで 25 kPa ときに示されている。図より衝撃波背後の温度が減少すれば、酸水素混合気を着火させるのに必要な圧力は増加する。これは、衝撃波マッハ数が小さく衝撃波背後における温度が低下した場合には、酸水素混合気の初期圧を高くしなければ着火しないことを意味する。すなわち、酸水素混合気の温度が低い条件で着火させるには気体が保有する単位体積当たりのエネルギーを高くする必要があることを示す。図より、酸水素混合気が伝達衝撃波背後において着火する場合のしきい値は、 $\ln p_2 - 1/T_2$ 線図上においてほぼ直線で表されることが解る。伝達衝撃波背後で燃焼波が生じる場合の圧力を本研究における臨界圧と定義すれば、臨界圧 p_c は次式で示すような指数関数で表すことができる。

$$p_c \approx 65.6 \exp\left(\frac{5.32 \times 10^5}{RT_2}\right) [\text{kPa}] \quad (5)$$

ここで、 R は酸水素混合気の気体定数であり、量論の酸水素混合気に対して $R = 692 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ である。伝達衝撃波背後の圧力が式(5)で求められる臨界圧 p_c よりも高い場合には、酸水素混合気は衝撃波背後で着火しデトネーション波が生成されることを示す。

5. まとめ

酸水素混合気中に衝撃波が入射した際、衝撃波背後で生じる燃焼波の挙動を明らかにすること目的と

- して実験を行った。酸水素混合気の当量比 ϕ , 初期圧 p_1 および入射衝撃波マッハ数 M_{si} を変化させて実験を行った結果、以下の知見が得られた。
- (1) 衝撃波が酸水素混合気に入射した際、本実験条件下では、以下の3種類の現象が観察されることを明らかにした。
 - (i) 入射衝撃波マッハ数が低い場合には、酸水素混合気は着火せず衝撃波のみが伝ばする。
 - (ii) 入射衝撃波マッハ数が比較的高い場合には、酸水素混合気が着火し、デフラグレーション波がデトネーション波へと遷移する DDT 現象が生じる。
 - (iii) 入射衝撃波マッハ数が高い場合には、衝撃波が酸水素混合気に入射した直後にデトネーション波が直接開始される。
 - (2) 衝撃波が酸水素混合気に入射した際の燃焼波の挙動については、管内径のデトネーションセルサイズに対する無次元距離 d/λ および伝達衝撃波マッハ数 M_{sl} を用いて整理することができる。
 - (3) 伝達衝撃波背後では、Semenov による爆発曲線では着火しない温度・圧力条件においても着火する。
 - (4) 伝達衝撃波背後において量論混合比の酸水素混合気が着火しデトネーション波が生成される臨界圧は、実験式(5)で表すことができる。

謝 辞

本実験を行うにあたり、本学吉橋照夫技師の協力を得た。ここに付記し謝意を表する。

文 献

- (1) Lee, J.H.S., Dynamic Parameter of Gaseous Detonations, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.16 (1984), pp.311–336.
- (2) Niioka, T., et al., Fundamental of Combustion Phenomena, Ohmsha, (2001).
- (3) Kobayashi, K., et al., Combustion Engineering – Fundamental and Applications –, Rikogakusha Publishing, (1988).
- (4) Ikui, T. and Matsuo, K., Mechanics of Shock Waves, Corona Publishing, (1983).
- (5) Anderson, J.D. Jr., Modern Compressible Flow with Historical Perspective, McGraw-Hill, Inc., (1990), 186–205.
- (6) Sakurai, T., et al., A Study on Pulse Detonation Engines in Saitama University, *J. of the Combustion Society of Japan*, Vol.47 (2005), pp.97–104.
- (7) Sakurai, T., et al., Investigation of the Purge Process on the Multi-Cycle Operations of a Pulse Detonation Engine, *Trans. of the Japan Society for Aeronautical and Space Science*, Vol.48, No.160 (2005), pp.78–85.
- (8) Huber, P.W., et al., Criteria for Self-Ignition of Supersonic Hydrogen-Air Mixtures, *NASA TP*, 1457 (1979).
- (9) Arai, T., et al., Experiments of Pre-Mixed Shock-Induced Combustion Scramjet with Forebody-Wall Fuel Injection, *AIAA 2002-5243* (AIAA/AAAF 11th Int. Space Planes and Hypersonic Systems and Technology Conference), (2002).
- (10) Kim, T.-H., et al., Experimental Study on Flow Field behind Backward-Facing Step using Detonation-Driven Shock Tunnel, *J. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.52, No.608 (2004), pp.385–392.
- (11) Obara, T., et al., Experimental Study on a Flow Field behind Backward-Facing Step using Detonation-Driven Shock Tunnel, *Proc. 20th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems, Montreal*, (2005), CD-ROM.
- (12) Meyer, J.W. and Oppenheim, A.K., On the Shock-Induced Ignition of Explosive Gases, *Proc. 13th Symp. (Int.) on Combustion*, (1970), pp.1153–1164.
- (13) Chue, R.S., et al., Transition from Fast Deflagration to Detonation under the Influence of Wall Obstacles, *AIAA, Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol.153 (1992), pp.270–282.
- (14) Wang, B.L., et al., Experimental Studies on Transition from Deflagration to Detonation in Lean H₂-air-steam Mixtures, *Proc. 22nd Int. Symposium on Shock Waves*, Vol.I (1995), pp.279–284.
- (15) Brown, C.J. and Thomas, G.O., Experimental Studies of Shock-Induced Ignition and Transition to Detonation in Ethylene and Propane Mixtures, *Combustion and Flame*, Vol.117 (1999), pp.861–870.
- (16) Brown, C.J. and Thomas, G.O., Experimental Studies of Ignition and Transition to Detonation Induced by the Reflection and Diffraction of Shock Waves, *Shock Waves*, Vol.10 (2000), pp.23–32.
- (17) Gelfand, B.E., et al., Detonation and Deflagration Initiation at the Focusing Shock Waves in Combustible Gaseous Mixture, *Shock Waves*, Vol.10 (2000), pp.197–204.
- (18) Urtiew, P.A. and Oppenheim, A.K., Detonation Ignition induced by Shock Merging, *Proc. 11th Symposium (Int.) on Combustion*, (1966), pp.665–670.
- (19) Steinberg, M. and Kaskan, W.E., The Ignition of Combustible Mixtures by Shock Waves, *Proc. 5th Symposium (Int.) on Combustion*, (1954), pp.664–672.
- (20) Kim, T.-H., et al., Experimental Study on Performance of Shock Tunnel Driven by Detonation Wave, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.691 (2004), pp.707–714.
- (21) Yamanaka, A., et al., Study on Performance of Detonation-Driven Shock Tube, *JSME Int. J., Series B*, Vol.45, No.2 (2002), pp.425–431.
- (22) Reynolds, C.W., STANJAN, <http://www2.mne.ksu.edu/chapman/thermo2/download.html/>.
- (23) Ohyagi, S., Fundamentals and Recent Advances in Detonation Researches I – Basic Theory and Experiments of Gaseous Detonations –, *Nensho Kenkyu (Combustion Research)*, Vol.124 (2001), pp.17–34.